

文章编号: 1000-0550(2008) 02-0283-11

南海北部陆坡构造坡折带中的天然气水合物

王宏斌^{1,2} 张光学² 梁 劲² 刘学伟¹ 梁金强²
龚跃华² 郭依群² 沙志彬²

(1 中国地质大学 地球物理与信息技术学院 北京 100083 2 广州海洋地质调查局 广州 510760)

摘 要 构造坡折带是由同沉积构造长期活动引起的沉积斜坡明显突变的地带,对盆地充填的可容纳空间和沉积作用可产生重要的影响,构造坡折带和油气资源分布有着较为密切的关系。本文首次把“构造坡折带”概念引入到天然气水合物调查研究中,认为:构造坡折带是天然气水合物发育和赋存的重要构造单元。论文从海底坡降、断层发育以及温压场环境等角度讨论了构造坡折带对天然气水合物的控制作用,发现 BSR 发育位置的海底坡降一般在 $10 \times 10^{-2} \sim 30 \times 10^{-2}$ 之间;利用论文中设计的相对构造强度的算法计算了南海北部陆坡 D 区的相对构造强度,发现相对构造强度的次高值区有利于水合物赋存;根据高分辨率地震数据计算的构造坡折带的温压场环境,发现构造坡折带中连续变化的温压场环境能够使游离气运移到适宜的温压场中并形成水合物。在对上述研究进行总结归纳的基础上,初步提出了南海北部陆坡构造坡折带中天然气水合物的成藏模式。

关键词 构造坡折带 水合物 构造强度 温压环境 模式

第一作者简介 王宏斌 男 1971 年出生 高级工程师 沉积学 E-mail: oceanwang 71@ 21cn.com

中图分类号 P542 TE122 **文献标识码** A

0 引言

坡折带是指是由同沉积构造长期活动引起的沉积斜坡具明显突变的地带。在层序地层学研究中,“坡折带”是一个极其重要的概念,构造活动正是通过对盆地地貌的控制,实现对盆地地层格架和沉积体系的影响^[1]。林畅松等^[2]通过对沾化凹陷较系统的研究提出“构造坡折带”的概念,指出构造坡折带是由同沉积构造长期活动引起的沉积斜坡明显突变的地带,它对盆地充填的可容纳空间和沉积作用可产生重要的影响,制约着盆地沉积相域的空间分布。大量资料显示构造坡折带和油气资源分布有着较为密切的关系^[2-6]。

天然气水合物被认为是 21 世纪理想的替代能源,由于其在资源、环境和全球变化中的重要意义而引起世界各发达国家的高度重视^[7-10]。我国在南海北部陆坡针对天然气水合物进行的地质、地球物理调查中,先后发现了一系列天然气水合物赋存的证据,如 BSR(Bottom Simulating Reflector)、速度异常、烃类气体以及孔隙水盐度异常等^[11-19]。2007 年 5 月,广州海洋地质调查局在南海北部陆坡神狐海域采获天然气水合物实物样品。大量的调查资料显示,南海北

部陆坡天然气水合物的发育和赋存明显受构造条件的控制。其中,构造坡折带是天然气水合物发育和赋存的重要构造单元。本论文主要从海底坡降、断层发育、温压场环境等角度,探讨构造坡折带对水合物发育的控制作用,并初步建立南海北部陆坡构造坡折带中水合物的成藏模式。

1 构造坡折带概念的引进

坡折带原指斜坡上一种突然变陡的过渡地形,将其引入构造学领域,称为构造坡折带,它是指断陷斜坡上地层产状突然变陡、沿凹陷走向延伸的一个条形地带,其上下两侧的地层产状相对较缓(图 1)^[20]。构造坡折带是一个古地形陡坡带,在构造活动强烈的地区往往是由同生断裂引起的,故又称其为断裂坡折带^[2,21,22]。根据边界断层、内部结构、平面展布、构造位置、发育演化阶段等,断裂坡折带还可以进一步划分为单断式坡折带、雁列断阶式坡折带、高位坡折带、中位坡折带、低位坡折带、继承性坡折带和阶段性坡折带等^[23]。林畅松等人在对我国东部中、新生代断陷盆地,如百色、二连、渤海湾等盆地的研究后发现,构造(断裂)坡折带是油气藏形成的极有利地带,其主要原因有四:(1)构造坡折带是砂岩厚度和砂岩层

数的加厚带,沿坡折带走向的碎屑体系供给部位可找到加厚的储集砂岩体;(2)构造坡折带多位于油气运移的上倾方向,同沉积断裂是重要的油气通道,又由于这些断裂的生长系数大,容易造成侧向岩性封堵,形成有利的断层封闭;(3)构造坡折带上除断块圈闭发育外,同断积断裂的明显活动和砂体的发育又有利于滚动背斜的形成。在渤海湾等断陷盆地中,无论是缓坡或陡坡带的构造坡折带都是滚动背斜发育的有利部位;(4)在发生过构造反转的裂陷盆地中,构造坡折带是应力易于集中的部位,形成构造反转背斜或反转强化的先存滚动背斜圈闭。同时,构造坡折带还是不整合面开始发育的部位,对分布和寻找不整合圈闭具有重要意义。

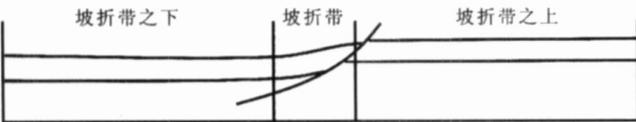


图 1 构造坡折带模式剖面示意图^[20]

Fig 1 A sketch section model of the structural slope break zone

在南海北部陆坡进行的天然气水合物调查中,研究人员发现:构造坡折带其实也是有利于天然气水合物发育和赋存的重要构造单元。需要说明的是,早在 2003 年笔者曾撰文讨论了南海陆坡区天然气水合物成藏的构造环境,该文认为南海陆坡区坳隆断裂带是天然气水合物赋存的有利构造部位^[24]。进一步的研究表明,坳隆断裂带与构造坡折带在构造部位上以及构造特征上均比较一致,鉴于“构造坡折带”这一概念研究相对成熟,现已被多数地质学家广泛接受,因此,作者在本论文中引进“构造坡折带”这一构造概念,着重讨论有利于天然气水合物发育和赋存的构造坡折带的坡度、构造条件、温压场环境等,并在此基础上初步建立构造坡折带中天然气水合物成藏模式。

2 海底坡降与水合物发育、赋存的关系

在天然气水合物构造控制的研究过程中,研究人员发现:海底坡度对天然气水合物成藏具有明显的控制作用,水合物一般发育在海底坡度较大的浅表层沉积物中,为进一步研究上述现象,论文对海底坡降与水合物发育和赋存进行了量化讨论。

2.1 坡降计算方法

海底坡降 G 采用下式进行计算:

$$G_{12} = \frac{|H_1 - H_2|}{D_{12}} \quad (1)$$

式中: H_1, H_2 为 1、2 两点的水深; D_{12} 为 1、2 两点的水平距离(图 2)。

2.2 结果分析

本论文对位于南海北部陆坡 D 区的 24 条地震测线(约 960 km)的海底坡降进行计算,结果发现:多数 BSR 发育在高坡降值区,反映了较大的海底坡降有利于天然气水合物的发育和赋存。图 3 中 a 和 b 分别为 D-1 和 D-2 测线的坡降剖面以及与 BSR 的对应关系。从图 3a 可以看出, D-1 测线坡降剖面上,BSR 显示段所对应的坡降一般在 $10 \times 10^{-2} \sim 30 \times 10^{-2}$ 之间,在炮号大于 2 000 的测线段,海底坡降较小,BSR 也不发育,显示 BSR 与高坡降值有很好的对应关系;在 D-2 测线坡降剖面中,BSR 显示段所对应的坡降在 20×10^{-2} 左右,虽然在 2 000~2 200 炮点间 BSR 显示段对应的海底坡降相对较低,但总体上 BSR 与高坡降值对应较好。

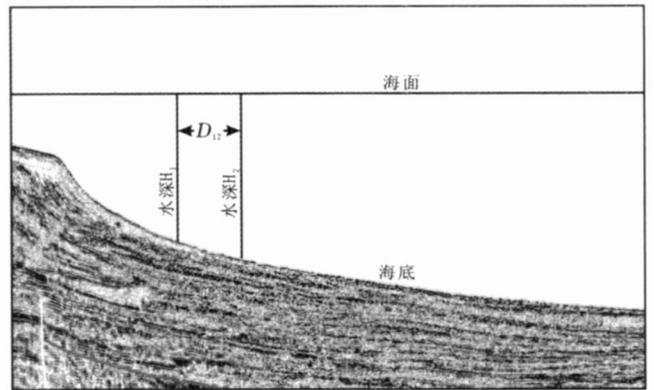


图 2 坡度计算示意图

Fig 2 The sketch section of calculation of seafloor gradient

对 24 条地震测线坡降计算结果进行统计发现,BSR 测线段所对应的平均坡降高于非 BSR 测线段的平均坡降。其中,BSR 测线段对应的平均坡降为 19.89×10^{-2} ,非 BSR 测线段的平均坡降为 10.57×10^{-2} 。并不是所有的 BSR 均对应于高的坡降值,个别地震剖面上的 BSR,反倒对应于较低的坡降值。上述研究表明,海底坡降是水合物赋存控制因素之一,高的海底坡降更有利于水合物的发育和赋存。同时,水合物的发育和赋存是海底地形地貌、构造沉积作用、气源及流体通量以及温压场环境等多种因素共同作用的结果,只有综合分析控制水合物形成和赋存的多因素,才能最终实现对水合物矿藏的准确定位。

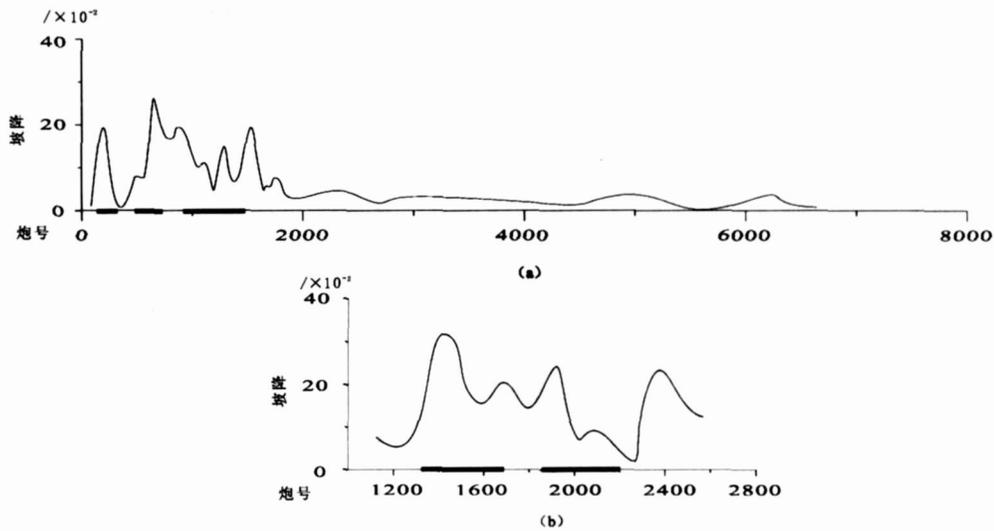


图 3 海流坡降与 BSR 的对应关系 (粗黑线段为 BSR 显示段), 图中可以看出 BSR 对应于海底坡降的高值区。

Fig 3 The relationship between the BSR and the seafloor gradient in corresponding position

3 断层发育

Mikov 强调构造对水合物的控制作用, 并因此把水合物分为构造圈闭型、地层圈闭型及复合圈闭型 3 种水合物成藏类型^[25]。特殊的构造系统对水合物富集具有重要的控制作用, 并形成不同的构造圈闭型式。这些构造系统包括活动断裂系统、泥火山以及其它构造系统。如墨西哥湾西北部水合物脊、哈肯摩滋比泥火山等。Wood 和 Ruppel^[26] 在研究 Blake Ridge 时指出, 活动断裂构造对水合物有构造控制作用, 水合物通常位于活动断裂附近。即使对一些地层圈闭型水合物矿藏, 如布莱克海脊、墨西哥湾的小型盆地、日本南海海槽等地的水合物, 构造控制因素对水合物的形成与稳定分布都是相当重要的。在南海北部陆坡 D 海区, 活动的断裂构造对水合物的形成具有重要的控制作用。

3.1 断层发育及其对水合物的控制

南海北部陆坡断层构造非常发育, 位于盆地边缘或次级构造单元部位的断层, 往往具有断距大、贯穿地层多的特点, 有的断层甚至从海底一直断至盆地基底。上述断层的存在能够对深部裂解气起到很好的疏导作用, 有利于深部气体向上运移和水合物聚集成藏。在高分辨率地震剖面上, 也往往可以看到 BSR 和深大断裂共生现象 (图 4)。

本论文着重讨论南海北部陆坡 D 区断层的平面分布特征及其与 BSR 分布之间的关系。D 区海底地形地貌复杂, 断裂构造发育, 均为正断层。晚上新世

以来的断裂系统按其走向不同可分成北东—北北东和北西向二组 (图 5)。其中北东—北北东向断裂无论从发育规模、数量上都比北西向断裂占优势, 控制了 D 区的主要构造走向, 断裂组在剖面上有从西北向东南呈阶梯状下降趋势, 倾向有北西、南东两组, 以南东、南东东倾向为主, 南东倾向断裂系和北西倾向断裂系及北西走向断裂系构成了 D 区自西向东显著隆、坳相间的地貌特征。有的断裂还可向下延至基底, 向上断层切穿晚中新世—上新世的大部分地层, 有的甚至达到海底, 说明断裂开始形成时期较早, 活动时间长; 北西向断裂也都属于正断层, 有切割北东向断层的趋势, 北西向断层相对主排列的北东向成为一组反向断层系。

从图 5 显示的断层平面分布和 BSR 的叠合关系上, 很难讨论断层发育和水合赋存之间的关系, 为进一步量化研究构造作用与水合物发育之间的关系, 本文首次引进了“构造强度”的概念, 对南海北部陆坡 D 区的构造强度进行了计算和研究。

3.2 构造强度研究

3.2.1 构造强度概念

地壳构造运动中, 岩层或岩块发生构造变形或构造位移, 以及由此产生的岩石相变和化学元素聚散, 组成构造岩相带和构造地球化学带。而这种相变和聚散的程度主要取决于构造变形和构造位移的程度, 即构造强度。构造强度常具韵律性的时间系统, 在空间上表现为构造强度场, 具有局域化的空间系统。其动态演化和有序化是它存在和发展的基本规律。构造

强度的研究包括构造性质、规模、状态及其活动规律,又研究与其相伴的岩石(沉积岩、变质岩、混合岩、岩浆岩)、矿物及其元素的相应变化和规律。不仅研究二者

的一般关系,而且强调二者的量化和量比关系。在应用方面,突出构造强度控矿研究。构造强度是个多层次、多类型的内涵广阔的大概念(表 1)^[27]。

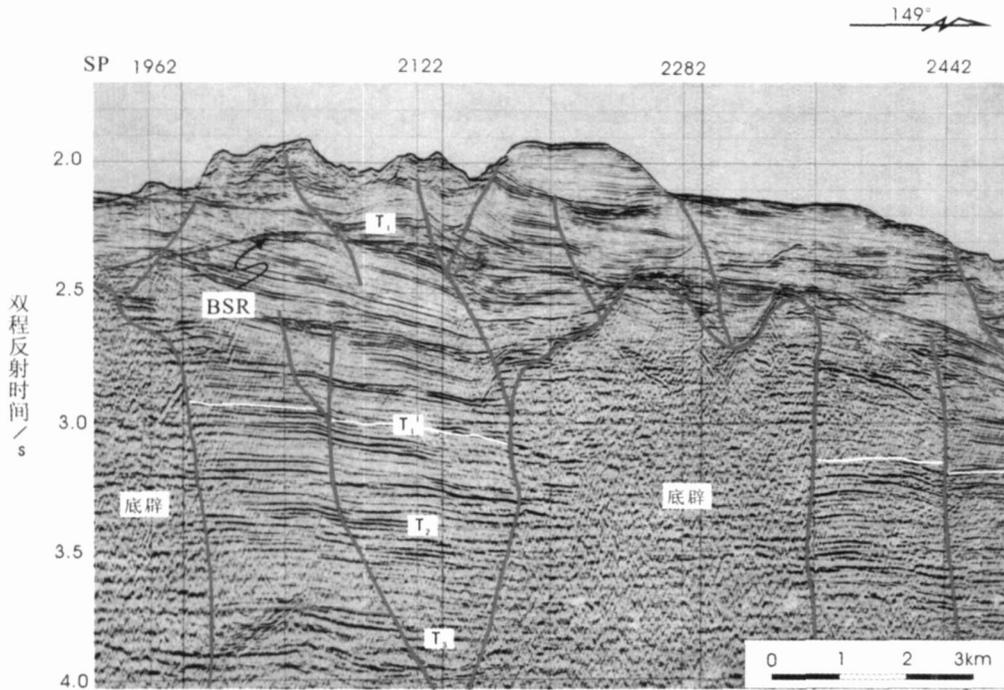


图 4 南海北部陆坡高分辨率地震剖面显示的 BSR 及断层

Fig 4 A high resolution profile in the north slope of the SCS showing BSR and faults

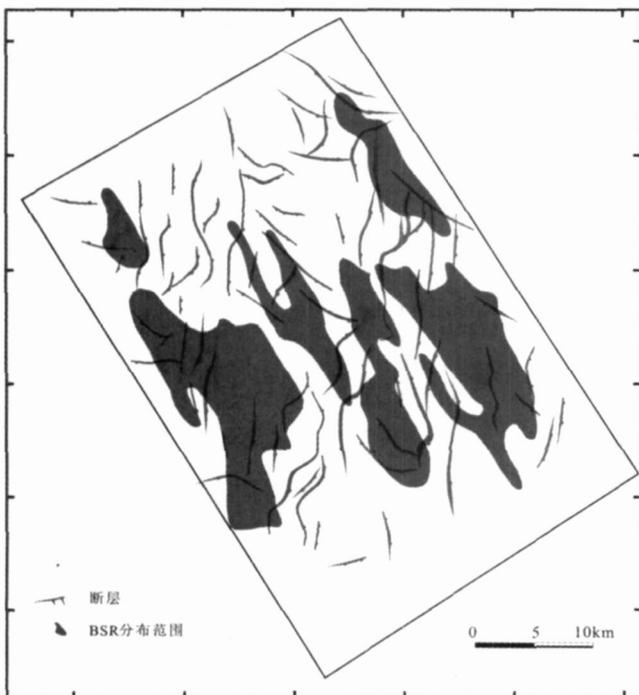


图 5 D区断层发育及 BSR 分布图

Fig 5 The distribution of BSR and faults in area D

表 1 构造强度概念分解(据关连绪, 2002, 修改)

Table 1 The notional decomposition of structural intensity

构造强度	构造变形	形变: 褶皱、断裂等
		体变: 矿物晶体、构造透镜、矿层厚度的变化等
	构造位移	水平位移: 推覆构造、强张构造等
		垂直位移: 地垒、地壳升降等
.....		

不同类型的构造强度目前难以量比。但同一构造单元内不同部位的构造强度却可以比较,如褶皱核部大于翼部。本文主要是基于地球物理资料提取了断层断距、断层密度等构造信息,利用下式对南海北部陆坡 D 区的构造强度进行了计算:

$$SI_G = C \cdot FT \cdot FH \cdot BD_G \quad (2)$$

式中: SI_G 为 G 点的构造强度, C 为系数, FT 、 FH 分别为 G 点所处断层的垂向断距和水平断距, BD_G 为 G 点所处断层的断层密度(图 6)。

3 2 2 结果分析

从计算的 D 区的构造强度图(图 7)可以看出,南海北部陆坡 D 区构造强度高值区主要呈环带状展

布。B₁~ B₆个 BSR 分布区中,除 B₁分布在构造强度低值区外, B₂~ B₆共 5 个 BSR 分布区均分布在构造强度高值区。此外,值得注意的是,在构造强度极高值分布区, BSR 并不发育,而在构造强度的次高值区, BSR 分布较为广泛。构造强度的次高值区,一般

来说位于大的控盆断裂的侧缘,次级断层发育,地层具有一定的坡度,十分有利于游离气的侧向运移,因此构造强度的次高值区,往往是水合物聚集成藏的有力部位,该图从构造角度反映了断层发育的构造坡折带部位有利于天然气水合物的发育和赋存。

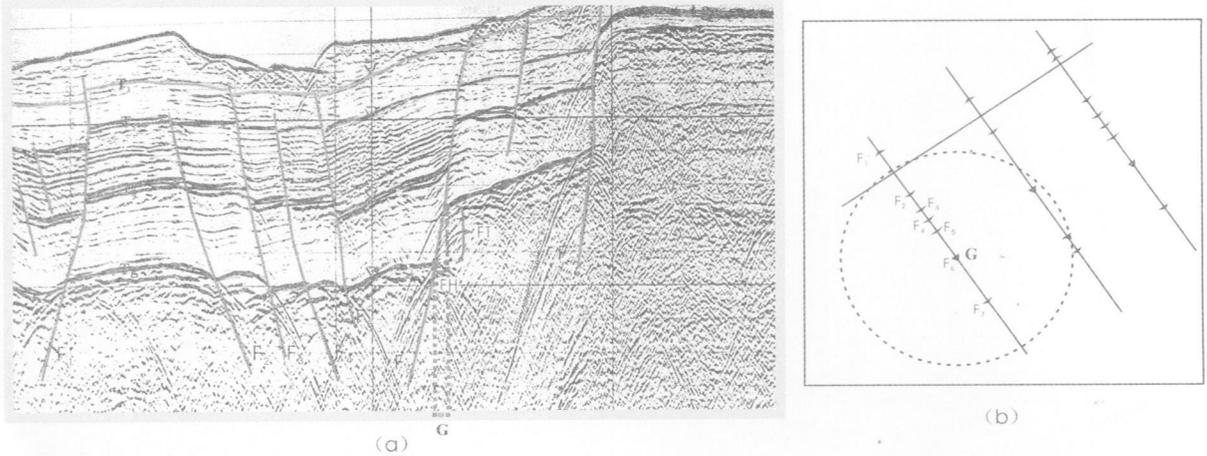


图 6 南海北部陆坡 D 区构造强度计算示意图

(a) 图为计算 G 点所处 F₀ 断层的 FT、FH 值示意图; (b) 图为计算 G 点所处 F₀ 断层 BD_c 值的示意图, (b) 图中绿色测线见 (a) 图。

Fig 6 The sketch plot of calculation of structural intensity in area D in the north slope of the SCS

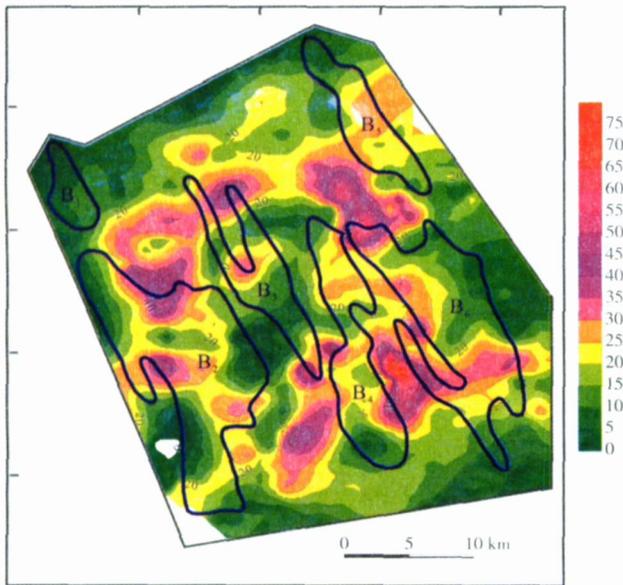


图 7 南海北部陆坡 D 区相对构造强度与 BSR 分布关系图

图中蓝色粗线圈闭的区域为 BSR 分布区, 分别标注为 B₁、B₂、B₃、B₄、B₅、B₆。

Fig 7 The relationship between the distribution of BSR and the structural intensity of area D in north slope of the SCS

4 温压环境

4.1 计算方法

4.1.1 海底沉积物的温度

温度是控制天然气水合物稳定存在的一个重要条件。本文根据海底温度和地温梯度来求取海底沉积层的现场温度。南海北部陆坡的海水深度和海底温度具有一定的相关性(图 8)^[28]。海底温度随着海水水深的增加而降低,当水深大于 2.8 km 时,海底温度趋于稳定(2.2℃);当水深小于 2.8 km 时,水深和海底温度在对数坐标系下呈线性相关,其拟合公式^[93]为:

$$\ln(d) = -1.3361 \ln(t) + 2.0339 \quad (3)$$

式中: d 为水深,单位为 km; t 为海底温度,单位℃。

南海北部陆坡海底实测地温梯度整体较为离散,其值一般在 9~132℃/km 的区间变化。钻孔中实测地温梯度变化范围相对较小,一般介于 14~76℃/km 之间,平均为 35.4℃/km。本项目在计算过程中结合 BSR 发育位置多次试算,认为采用 35.4℃/km 的地温梯度值比较适合本区实际。

4.1.2 海底沉积物的压力

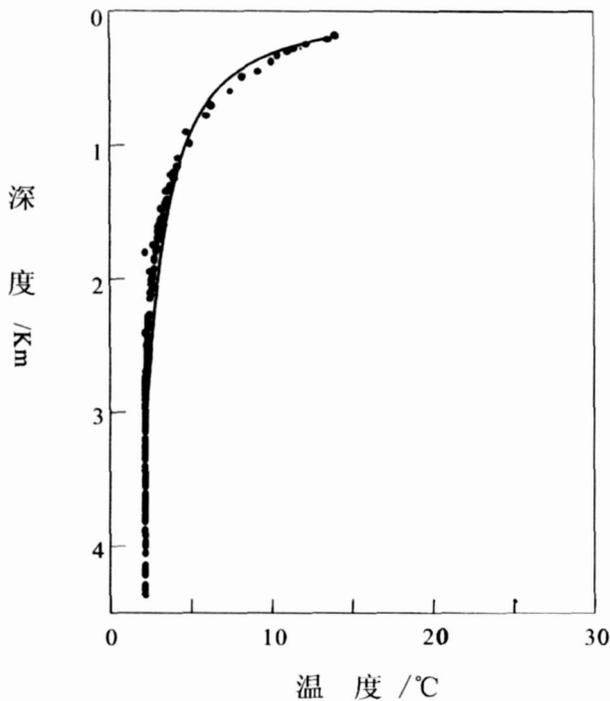


图 8 南海北部陆坡海底温度与水深关系曲线 [27]

Fig 8 The relationship between depth and temperature of seafloor in the north slope of the SCS

海底沉积物压力的计算主要包括两种形式: 静水压力和静岩压力。静水压力是以流体静压力计算海面至海底以下的全程压力; 静岩压力是在海水中以静水压力计算, 在海底之下沉积物中以静岩压力计算 [29]。一些学者 [30~33] 认为在松散的海底沉积物内, 孔隙水相互连通并与底层水相连, 沉积物中孔隙水压力即为静水压力 p_{hydro} , 可以用如下经验公式进行计算:

$$p_{\text{hydro}} = p_{\text{atm}} + \rho_{\text{sw}} g (h + z) \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中: p_{atm} 为大气压, 其值为 0.101 325 MPa; h 为水深; z 为海底沉积物距海底的深度; h 和 z 的单位为 m, g 为重力加速度, ρ_{sw} 为平均海水密度。

另一些学者 [34~35] 考虑到沉积物在经历了一定程度的早期成岩作用后, 沉积物中孔隙水之间的连通受阻, 且天然气水合物的形成也能阻碍孔隙水的连通, 这样就切断了沉积物中孔隙水与地层海水的联系, 所以, 以沉积物静岩压力 p_{lith} 表征沉积物压力更接近客观实际, 采用如下经验公式计算:

$$p_{\text{lith}} = p_{\text{atm}} + g (\rho_{\text{sw}} h + \rho_{\text{buk}} z) \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中: ρ_{buk} 为沉积物平均体密度, 其它物理量及单位同经验公式 (式 4)。

本文采用静岩压力 p_{lith} 进行计算。为提高计算精度, 计算中采用沉积物体密度代替沉积物平均体密度, 经验公式 5 修正为:

$$p_{\text{lith}} = p_{\text{atm}} + g (\rho_{\text{sw}} h + \int_0^z \rho_{\text{buk}} dz) \times 10^{-6} \quad (6)$$

式中: ρ_{buk} 为沉积物体密度。海底之下沉积物中的静岩压力, 由沉积物体密度在深度上积分求得。

4.2 参数的选择与计算

选择位于南海北部陆坡的高分辨率地震测线 D-3 进行温压场的计算和分析。该测线由广州海洋地质调查局“奋斗五号”科学调查船 2001 年 6 月采集。震源为美国生产的 8 个 20 in³ 套筒枪组成的相干枪阵。采集过程中, 枪阵沉放深度为 2 m, 电缆沉放深度 4~6 m, 记录道数为 96 道, 记录长度 6 s, 采样率为 1.0 ms。

为提高沉积物静岩压力的计算精度, 计算中利用 D-3 的叠加速度, 采用 Gardner 方程 $\rho = av^{1/4}$ 求取了沉积物的体密度, 其中, ρ 为沉积物体密度, 单位为 g/cm^3 ; v 为声波速度, 单位为 m/s ; a 为 Gardner 系数, 一般取 0.31。对沉积物体密度计算结果分析表明, 沉积物体密度与深度 (从海底起算) 之间的相关性较为明显, 如图 9 所示, 其函数关系可拟合为:

$$\rho_{\text{buk}} = -10^{-8} Z^2 + 0.0001Z + 1.8565 \quad (7)$$

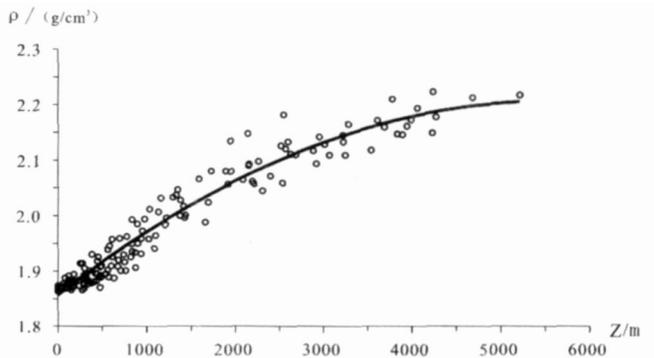


图 9 海底沉积物深度与体密度之间关系 (深度从海底起算)

Fig 9 The relationship between the body density and depth of the sediment (the depth referred to the seafloor)

把体密度拟合关系式带入修正后的静岩压力公式得:

$$p_{\text{lith}} = p_{\text{atm}} + g (\rho_{\text{sw}} h + Z \int_0^z (-10^{-8} z^2 + 0.0001z + 1.8565) dz) \times 10^{-6} \quad (8)$$

该式进一步展开为:

$$p_{\text{liq}} = 0.101325 + 1.0104 \times 10^{-2}h - 9.81 \times 10^{-14}Z^4 + 9.81 \times 10^{-10}Z^3 + 1.8212 \times 10^{-5}Z^2 \quad (9)$$

式中物理量及单位同公式(式 4)。

根据上述公式,分别计算了南海北部陆坡 D 区 D-3 中 5~30 MPa 的等压面和 10~30℃ 等温面的深度(温度和压力间隔分别为 5℃ 和 5 MPa),计算结果如表 2 所示。为了方便与时间剖面进行对比,最后还利用时深转换公式对计算结果进行了深度—时间转换,深度—时间转换公式如下:

$$\begin{cases} z = 207.05t^2 + 862.51t & (0 \leq t \leq 1s) \\ z = 408.69t^2 + 450.56t + 210.69 & (1s < t \leq 2s) \\ z = 211.33t^2 + 1028.5t - 126.99 & (t > 2s) \end{cases} \quad (10)$$

式中: t 为双程反射时间; Z 为时间 t 所对应地层深度。将计算结果绘制在地震剖面下方,如图 10 所示。

4.3 结果分析

D-3 测线的等温面和等压面计算结果表明,构造坡折带具有有利于天然气水合物发育和赋存的温压条件。从图 10 可以看出,在整条测线中,15℃ 等温线先后与 5、10、15 MPa 三条等压线相交,共有六个交点,其中,与 5 MPa 等压线相交于点 A,与 10 MPa 等压线相交于点 B,与 15 MPa 等压线依次相交于点 C、点 D 和点 E,与 20 MPa 等压线相交于点 F(图上用黑色圆点表示)。该现象说明在构造坡折带 15℃ 的等温面上,从点 A 到点 F 的测线段,压力在 5 MPa 到 20 MPa 的区间内连续变化。在上述区间内,局部区域的温压场环境位于水合物稳定域范围内,如点 C 至点 F

间,BSR 处的温度约为 14~16℃,压力介于 14~19 MPa 间,符合水合物赋存的稳压条件。剖面上也可清晰识别强 BSR(S-BSR),显示该区可能赋存天然气水合物。

另一方面也可以看出,在构造坡折带内,并不是处处均有利于天然气水合物的发育和赋存。如在点 A 至点 B 区间内,水体相对较浅,浅层沉积物中的温度较高,对应压力较低,不利于天然气水合物的形成。尽管有的专家认为,该段剖面中同样识别了 BSR(见图 10 中? BSR,文中暂称疑似 BSR),但笔者认为该段 BSR 并不可信。

为验证上述看法,笔者分别在炮号 161~721(A 至 B 区间)的疑似 BSR 和炮号 801~1521(C 至 F 区间)的 BSR 上选取了 12 个样品点,利用前文给出的计算公式及参数,计算了 12 个样品点的温度和压力值,把上述 12 个样品点的温度、压力计算结果投影到水合物相平衡曲线图上可以发现(图 11):位于 BSR 上的 8 个样品点,除点 ⑧、点 ⑩和点 ⑫在水合物相平衡曲线附近摆动外,其它 5 个点均位于水合物形成区内;而位于疑似 BSR 上的 4 个样品点,除点 ④位于水合物形成区外,其它 3 个点均远离水合物形成区。上述现象反映了疑似 BSR 解释的不确切性。在点 F 之外水体更深的区域,浅层沉积物中压力进一步升高,如果仅就温、压场条件而言,该区域有利于水合物的发育。但是,从构造上来说,该区实际上已远离构造坡折带,无论气源条件还是水合物成藏的动力学条件,均不利于天然气水合物的发育。上述分析可以发

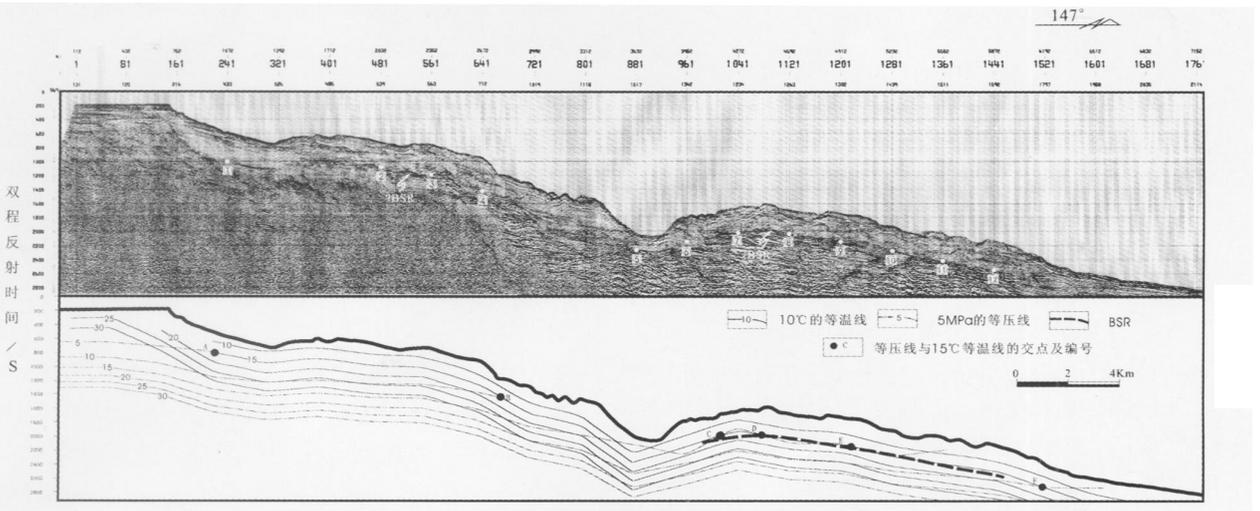


图 10 D-3 的地震剖面及其温压剖面

Fig 10 Seismic profile D-3 with its temperature-pressure profile

表2 D-3等压面及等温面计算结果

Table 2 Isothermal and isobaric data of profile D-3

炮号	1	81	161	241	321	401	481	561	641	721	801	881	961	1041	1121	1201	1281	1361	1441	1521	1601	1681	1761			
水深 /m	131	125	216	433	526	485	539	563	712	1019	1118	1517	1342	1234	1263	1302	1439	1511	1592	1797	1958	2035	2114			
海底静水压力 /MPa	1.42	1.36	2.28	4.48	5.42	5	5.55	5.79	7.3	10.4	11.4	15.43	13.66	12.57	12.86	13.26	14.64	15.37	16.19	18.26	19.89	20.66	21.46			
等压面 /MPa	5																									
	深度 /m	438	442	382	169																					
	时间 /ms	458	461	404	187																					
	10																									
	深度 /m	675	677	641	543	495	517	488	475	382																
	时间 /ms	674	676	643	556	512	532	505	493	403																
	15																									
	深度 /m	846	848	819	746	713	728	708	699	640	496	440	290	362	340	307	140									
	时间 /ms	820	821	797	736	707	720	702	695	643	513	459	459	312	384	362	330	156								
	20																									
	深度 /m	987	988	964	903	876	888	872	865	819	713	676	495	581	629	616	599	535	498	452	307	79				
	时间 /ms	934	936	916	867	845	855	841	835	797	707	674	511	590	633	622	607	548	514	471	330	90				
25																										
深度 /m	1109	1110	1089	1036	1012	1023	1009	1008	964	877	847	712	774	810	801	788	741	715	684	599	523	482	436			
时间 /ms	1030	1031	1015	974	955	963	952	947	916	845	820	706	759	790	782	771	731	708	682	607	537	499	456			
30																										
深度 /m	1218	1219	1200	1153	1132	1141	1129	1123	1088	1013	987	876	926	956	948	938	899	921	898	875	850	825	800			
时间 /ms	1113	1114	1099	1064	1048	1055	1046	1041	1015	955	935	844	886	910	904	895	863	881	863	843	823	802	781			
海底温度 /C	21	22	14	9	7	8	7	7	6	5	4	3	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3			
等温面 /C	10																									
	深度 /m			40	73	60	77	83	116	155	163	188	179	172	174	176	184	187	191	199	204	206	209			
	时间 /ms			46	83	68	87	95	130	172	182	207	198	191	193	195	203	207	211	219	225	227	229			
	15																									
	深度 /m			16	182	214	201	218	225	257	296	305	329	320	313	315	317	325	329	332	340	345	348	350		
	时间 /ms			19	201	235	222	239	246	279	319	327	352	343	336	338	340	348	351	355	363	368	370	372		
	20																									
	深度 /m			157	323	356	342	359	366	398	437	446	470	461	454	456	459	466	470	474	481	487	489	491		
	时间 /ms			175	346	378	365	382	388	419	457	465	488	479	473	475	477	484	488	491	499	503	506	507		
	25																									
	深度 /m	114	92	299	464	497	484	501	507	539	579	587	611	602	596	598	600	608	611	615	623	628	630	632		
	时间 /ms	128	105	321	482	513	501	516	523	552	588	596	617	609	603	605	607	614	617	620	627	632	634	636		
30																										
深度 /m	255	234	440	605	638	625	642	648	681	720	728	753	744	737	739	741	749	752	756	764	769	771	774			
时间 /ms	277	255	459	612	641	629	644	650	679	713	720	741	733	727	729	731	738	741	744	751	755	757	759			

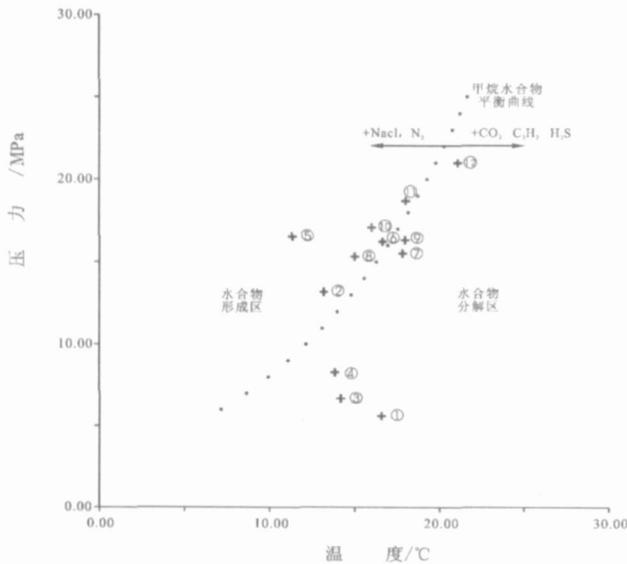


图 11 疑似 BSR 和 BSR 上样品点温度压力散点图

图中甲烷水合物相平衡曲线据 Dickens 甲烷水合物温压方程绘制, 散点位置见图 10

Fig 11 The T-P dots of the samples in the BSR and BSR

重要构造单元, 在构造坡折带内, 连续变化的温压场环境能够为天然气水合物的形成与赋存提供适宜的温压条件。另外, 在构造坡折带内部, 并不是处处均有利于水合物形成, 这和构造体内部具体的温度和压力条件有关。此外, 构造坡折带中的气源条件以及气体输导系统, 均影响和控制了构造坡折带中天然气水合物的发育和赋存。

5 成藏模式

综合以上的研究成果可以看出, 构造坡折带的构造格局主要从以下几方面为天然气水合物的形成和聚集提供了构造上的便利因素: 一是深部断层为深层气体的向上运移提供了良好的通道, 有利于深部气源向上运移; 二是构造坡折带是砂岩厚度和砂岩层数的加厚带, 沿坡折带走向分布的砂岩体可以为气体侧向运移提供了良好的疏导系统; 三是构造坡折带中较大坡降和连续增加的水深能够形成一个连续变化的温、压场环境, 游离气运移到适宜的温、压场中则形成水合物; 并且, 构造坡折带往往也是有机质和微生物集中的场所, 该场所能产生大量的生物气, 为天然气水

现, 构造坡折带是天然气水合物发育的一个非常

合物的形成提供了充足的物质基础(图 12)。

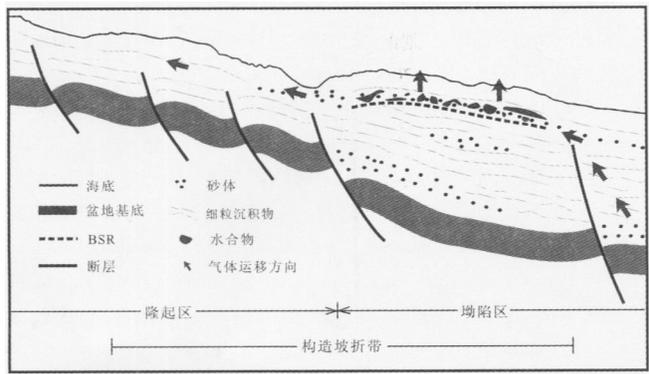


图 12 南海北部陆坡构造坡折带中水合物成藏模式图

Fig 12 The deposit model of gas hydrates in the structural slope break zone in North Slope of SCS

6 结论

本论文首次把“构造坡折带”的概念引入到天然气水合物调查研究中,并从海底坡降、断层发育以及温压场环境等角度讨论了构造坡折带对天然气水合物的控制作用,并初步建立了南海北部陆坡构造坡折带中水合物的成藏模式。统计表明,BSR发育位置的海底坡降一般在 $10 \times 10^{-2} \sim 30 \times 10^{-2}$ 之间,论文在设计相对构造强度算法的基础上,计算了南海北部陆坡 D 区的相对构造强度,结果显示相对构造强度的次高值区有利于水合物赋存,构造强度的次高值区,一般来说位于大的控盆断裂的侧缘,次级断层发育,地层具有一定的坡度,十分有利于游离气的侧向运移。根据高分辨率地震数据计算了构造坡折带的温压场环境,结果表明:构造坡折带中连续变化的温压场环境能够使游离气运移到适宜的温压场中并形成水合物。

参考文献 (References)

- 任建业, 陆永潮, 张青林. 断陷盆地构造坡折带形成机制及其对层序发育样式的控制 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2004, 29(5): 596-602 [Ren Jianye, Lu Yongchao, Zhang Qinglin. Forming mechanism of structural slope-break and its control on sequence style in faulted basin [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2004, 29(5): 596-602]
- 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2000, 25(3): 260-266 [Lin Changsong, Pan Yuanlin, Xiao Jianxin et al. Structural slope-break zone key concept for stratigraphic sequence and analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2000, 25(3): 260-266]
- 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术——高精度地震探测基础上的层序地层学研究 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2002, 27(5): 592-598 [Li Sitian, Pan Yuanlin, Lu Yongchao et al. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins—sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2002, 27(5): 592-598]
- 姜秀芳, 宗国洪, 郭玉新, 等. 断裂坡折带低位扇成因及成藏模式 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(2): 143-155 [Jiang Xiufang, Zong Guohong, Guo Yuxin et al. Origin of lowstand fan in faulted-topographic break and play's characteristics [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(2): 143-155]
- 刘豪, 王英民, 王媛, 等. 大型拗陷湖盆坡折带的研究及其意义——以准噶尔盆地西北缘侏罗纪拗陷湖盆为例 [J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 95-102 [Liu Hao, Wang Yingmin, Wang Yuan, et al. Study on slope breaks in large downwarped lake basins and its significance—a case study from Jurassic lake in northwestern Junggar Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 95-102]
- 王英民, 刘豪, 李立诚, 等. 准噶尔大型拗陷湖盆坡折带的类型和分布特征 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2002, 27(6): 683-688 [Wang Yingmin, Liu Hao, Li Licheng, et al. Types and distribution characteristics of slope breaks of large-type downwarped lake basins [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2002, 27(6): 683-688]
- Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kupuk River area, North Slope Alaska [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1993, 77(5): 793-812
- Yamazaki Akina. MIT's plan of research and development for technology of methane hydrate development as domestic gas resources [C]. Copenhagen 20th World Gas Conference, 1997
- Anon. Gas hydrates to boost India's gas resource [J]. Oil and Gas Journal, 1997, 95(37): 28-39
- 雷怀彦, 王先彬, 房玄, 等. 天然气水合物研究现状与未来挑战 [J]. 沉积学报, 1999, 17(3): 493-498 [Lei Huaiyan, Wang Xianbin, Fang Xuan, et al. Current situation of gas hydrates research and challenges for future [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(3): 493-498]
- 姚伯初. 南海北部陆缘天然气水合物初探 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(4): 11-181 [Yao Bochu. Preliminary exploration of gas hydrate in the northern margin of the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 18(4): 11-181]
- 姚伯初. 南海的天然气水合物矿藏 [J]. 热带海洋学报, 2001, 20(2): 20-281 [Yao Bochu. The gas hydrate in the South China Sea [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2001, 20(2): 20-281]
- 张光学, 黄永祥, 祝有海, 等. 南海天然气水合物的成矿远景 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1): 75-81 [Zhang Guangxue, Huang Yongxiang, Zhu Youhai et al. Prospect of gas hydrate resources in the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Ge-

- ogy, 2002, 22(1): 75-81]
- 14 刘学伟, 李敏锋, 张聿文, 等. 天然气水合物地震响应研究——中国南海 HD152 测线应用实例 [J]. 现代地质, 2004, 33-38 [Liu Xuewei, Li Minfeng, Zhang Yuwen, *et al.* Studies of seismic characteristics about gas hydrate—a case study of line HD152 in the South China Sea [J]. *Geoscience*, 2004, 33-38]
 - 15 刘坚, 陆红锋, 廖志良, 等. 东沙海域浅层沉积物硫化物分布特征及其与天然气水合物的关系 [J]. 地质前缘, 2005, 3: 258-262 [Liu Jian, Lu Hongfeng, Liao Zhiliang, *et al.* Distribution of sulfides in shallow sediments in Dongsha area, South China Sea, and its relationship to gas hydrates [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 3: 258-262]
 - 16 苏新, 陈芳, 于兴河, 等. 南海陆坡中新世以来沉积物的特性与气体水合物的分布初探 [J]. 现代地质, 2005, 3: 1-13 [Su Xin, Chen Fang, Yu Xinghe, *et al.* A pilot study on Miocene through Holocene sediments from the continental slope of the South China Sea in correlation with possible distribution of gas hydrates [J]. *Geoscience*, 2005, 3: 1-13]
 - 17 陈多福, 姚伯初, 赵振华, 等. 珠江口和琼东南盆地天然气水合物形成和稳定分布的地球化学边界条件及其分布区 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(4): 73-78 [Chen Duofu, Yao Bochun, Zhao Zhenhua, *et al.* Geochemical constraints and potential distributions of gas hydrates in Pearl River Mouth basin and Qiongdongnan basin and in the northern margin of the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 73-78]
 - 18 蒋少涌, 杨涛, 薛紫晨, 等. 南海北部海区海底沉积物中孔隙水的 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 浓度异常特征及其对天然气水合物的指示意义 [J]. 现代地质, 2005, 19(1): 45-54 [Jiang Shaoyong, Yang Tao, Xue Zichen, *et al.* Chlorine and sulfate concentrations in porewaters from marine sediments in the northern margin of the South China Sea and their implications for gas hydrate exploration [J]. *Geoscience*, 2005, 19(1): 45-54]
 - 19 祝有海, 饶竹, 刘坚, 等. 南海西沙海槽 S14 站位的地球化学异常特征及其意义 [J]. 现代地质, 2005, 19(1): 39-44 [Zhu Youhai, Rao Zhu, Liu Jian, *et al.* Geochemical anomalies and their implication from site 14, the Xisha trough, the South China Sea [J]. *Geoscience*, 2005, 19(1): 39-44]
 - 20 李振宏, 崔泽宏, 李林涛. 断裂坡折带对海相沉积层序的影响——以鄂尔多斯盆地西缘奥陶系海相碳酸盐岩为例 [J]. 海相油气地质, 2004, 9(1-2): 31-36 [Li Zhenhong, Cui Zehong, Li Lintao. Influence of fractured slope break zone on sedimentary sequence cases of Ordovician marine carbonate rock in the western margin area of Ordos Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2004, 9(1-2): 31-36]
 - 21 林畅松, 刘景彦, 张燕梅. 沉积盆地动力学与模拟研究 [J]. 地质前缘, 1998, 5(增刊): 119-125 [Lin Changsong, Liu Jingyan, Zhang Yanmei. Geodynamic and modeling of sedimentary basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(Suppl): 119-125]
 - 22 杨道庆, 赵追, 贾曙光, 等. 东庄次凹边缘断层坡折带对油气成藏的作用 [J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 21(3): 14-16 [Yang Daoqing, Zhao Zhui, Jia Shuguang, *et al.* Reservoir forming conditions in fault slope break at the margin of Dongzhuang subdepression [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2002, 21(3): 14-16]
 - 23 方玉斌, 刘秋生, 刘淑, 等. 缓坡坡折带——箕状断陷的精华 [J]. 断块油气田, 2003, 10(1): 15-18 [Fang Yubin, Liu Qiusheng, Liu Shu, *et al.* Slow slope fold belt—the soul of half graben rift [J]. *Fault-block Oil & Gas Field*, 2003, 10(1): 15-18]
 - 24 王宏斌, 张光学, 杨木壮, 等. 南海陆坡天然气水合物成藏的构造环境. 海洋地质与第四纪地质 [J]. 2003, 23(1): 81-86 [Wang Hongbin, Zhang Guangxue, Yang Muzhuang, *et al.* Structural circumstance of gas hydrate deposition in the continent margin, the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(1): 81-86]
 - 25 Milkov A V. Worldwide distribution of submarine volcanoes and associated gas hydrates [J]. *Marine Geology*, 2000, 167: 29-42
 - 26 Xu W, Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1999, 104: 5081-5096
 - 27 关连绪. 浅谈构造强度控矿 [J]. 黄金地质, 2002, 8(4): 1-7 [Guan Lianxu. Discussion on ore control of tectonic strength [J]. *Gold Geology*, 2002, 8(4): 1-7]
 - 28 冯志强, 冯文科, 薛万俊, 等. 南海北部地质灾害及海底工程地质条件评价 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1996 [Feng Zhiqiang, Fei Wenke, Xue Wanjun, *et al.* Evaluation of Marine Geologic Hazards and Engineering Geological Conditions in the Northern South China Sea [M]. Nanjing: Hohai University Publishing House, 1996]
 - 29 王淑红, 宋海斌, 彦文, 等. 天然气水合物稳定带的计算方法与参数选择探讨 [J]. 现代地质, 2005, 19(1): 101-107 [Wang Shuhong, Song Haibin, Yan Wen, *et al.* Discussion of the calculation methods and selection of parameters of the gas hydrate stability zone [J]. *Geoscience*, 2005, 19(1): 101-107]
 - 30 Kaul N, Rosenberger A, Villinger H. Comparison of measured and BSR-derived heat flow values Makran accretionary prism, Pakistan [J]. *Marine Geology*, 2000, 164(1-2): 37-51
 - 31 Hyndman R D, Wang K, Yuan T, *et al.* Tectonic sediment thickening, fluid expulsion, and the thermal regime of subduction zone accretionary prisms—the Cascadia margin off Vancouver Island [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1993, 98: 21865-21876
 - 32 Hyndman R D, Foucher J P, Yanano M, *et al.* Deep sea bottom-simulating reflectors—calibration of the base of the hydrate stability field as used for heat flow estimates [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 109: 289-301
 - 33 Davis E E, Hyndman R D, Villinger H. Rates of fluid expulsion across the northern Cascadia accretionary prism: constraints from new heat flow and multichannel seismic reflection data [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1990, 95: 8869-8889
 - 34 Tanaka K, Pisciotto K, Allen J, *et al.* Shipboard Scientific Party (hole 796). Site 796 (Leg 127). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports [C]. College Station, Texas: Texas A&M University (Ocean Drilling Program), 1990: 247-322
 - 35 Trehu A M, Lin G, Maxwell E, *et al.* A seismic reflection profile across the Cascadia subduction zone offshore central Oregon, New con-

Gas Hydrates in the SSBZ in the North Slope of the South China Sea

WANG Hong-bin^{1,2} ZHANG Guang-xue² LIANG Jin² LIU Xue-wei¹
LIANG Jin-qiang² GONG Yue-hua² GUO Yi-qun² SHA Zhi-bin²

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760)

Abstract The structural slope break zone (SSBZ), which constrains the change in the accommodation space of the basins controlling the development of the depositional sequence and the distribution of the depositional system tracts and the sand bodies resulting in the abrupt change of the depositional slope is initiated by the long term activity of syndepositional structure. Researches show that distribution of petroleum is closely connected with the SSBZ. The paper introduce the term of "Structural Slope-Break Zone" into the investigation and research of gas hydrate first time and concludes that SSBZ is an important structural unit for the formation and accumulation of gas hydrate. Furthermore, the paper analyzes the role of SSBZ controlling in gas hydrate in view of gradient of seafloor, fault temperature and pressure. Statistics show that the average gradient of the seafloor where BSR is recognized is between $10 \times 10^{-2} \sim 30 \times 10^{-2}$. The paper calculates the structural intensity of area D in the north slope of the SCS by introduction of structural intensity and design of algorithm, which shows that there are some favorable relationship between areas of hypo-value of structural intensity and BSR. The paper calculates the temperature and pressure in SSBZ based on high resolution seismic data and finds that the free gas can always meet the favorable P-T environment and form gas hydrates when the gas transfers in the SSBZ because of the continuously various P-T environment in the structure. We put forward a model of the accumulation of gas hydrate in SSBZ primarily in the end based on the summarizing of the achievements mentioned above.

Key words Structural Slope Break Zone (SSBZ), hydrate, structural intensity, T-P environment, model